

案例 10

按照六西格玛 DMAIC 流程改进 A 企业自动焊接质量

来源	国家自然科学基金 (70372062, 70572044); 教育部新世纪优人才支持计划 (NCET-04-0240)	类别	<input checked="" type="checkbox"/> 案例 <input type="checkbox"/> 方法
作者	施亮星 何桢	关键词	DMAIC 质量改进 六西格玛
理论知识	DMAIC 质量改进	适用层次	<input checked="" type="checkbox"/> 本科生 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生 <input type="checkbox"/> MBA

1. 案例背景

A 企业空调产品的焊接质量缺陷中, 自动焊接工序造成的缺陷占 70%左右, 因此, 提高自动焊接工序的质量水平是十分重要的。焊接缺陷导致大量的报废、补焊, 由于焊点泄漏产品在销售过程后的保修成本也非常惊人, 企业每年在这方面的直接经济损失就达到 1000 万元; 所以, 改善自动焊接工序的质量十分必要也十分迫切。生产过程中的半圆管与 U 型管的配合、自动焊接质量等都会影响焊接缺陷。但是, 对引起该质量问题的原因尚不清楚。在这种情况下, 选择采用六西格玛改进问题的流程来对该问题立项研究^[1]。

2. 案例描述

2.1 定义

项目选题: 项目小组经过讨论及分析, 从公司战略和提高顾客满意度出发, 确定选题。项目小组拟通过提高自动焊接的质量水平, 降低焊接缺陷, 减少保修成本, 提升企业质量品牌, 支撑企业实现进入全国空调制造企业前三名, 并与国际著名企业品牌相抗衡的战略目标。

改进机会: 项目小组进而分析了该项目的改进机会。当前, 自动焊接工序造成的缺陷占 70%左右, 企业每年在这方面的直接经济损失就达到 1000 万元; 当前 DPHU 为 6, 按每个产品上有 40 个焊点计算, 目前质量水平为 $DPMO=1500$, 西格玛水平为 4.47。企业高层要求该关键工序的 DPHU 应在 2 以下。

项目目标: 通过本项目团队的质量改进, 在五个月内实现 DPHU 在 2 以下, 节约保修费用每年 400 万元。

项目范围: 项目小组同时界定了该项目的项目范围。该过程的 SIPOC 图如图 1 所示, 同时, 根据项目特点及项目的可操作性两方面考虑, 确定项目的范围是从冲片工序开始一直到产品检验入库为止。

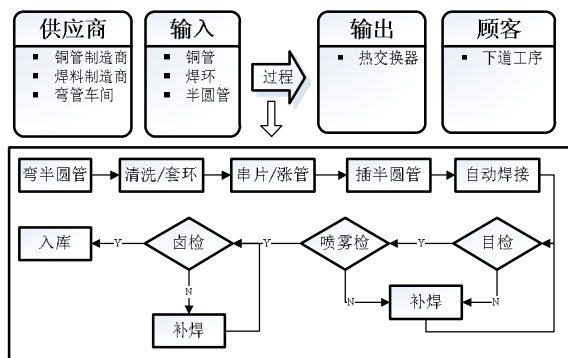


图 1 SIPOC 图

此外，项目小组还详细制定了项目的时间安排及预期成果。

2.2 测量

测量阶段的主要任务是确认测量系统的能力是否充分，必要时对测量系统进行改善。并在此基础上测定相关指标的当前绩效水平。

在了解过程的基础上，找出影响焊接不良的主要因素，即找出影响 CTQ (Y) 的主要因素 (X)。为此，小组成员根据工程经验，确定主要影响因素为半圆管中心距及自动焊工序。

半圆管的弯管过程由弯管机完成，再由测量人员利用测量仪器对半圆管中心距进行测量。而对于焊接缺陷的检验则是依靠检验员目视检验进行的。在 DMAIC 的测量阶段，在做进一步的数据分析之前，应该首先确保相关测量系统的能力充分。因此，应对这两个测量系统分别进行分析。

半圆管中心距测量系统分析

随机选两名测量者，并抽取 10 个半圆管作为样品，将这 10 个样品随机分配给两名测量者进行测量，并且使每位测量者对每个零件重复测量 3 轮。测量数据如表 1 所示。半圆管的公差为 25.4 ± 0.1 。

表 1 半圆管测量系统分析数据

样品	测量员A			测量员B		
	第1轮	第2轮	第3轮	第1轮	第2轮	第3轮
1	25.304	25.302	25.304	25.28	25.282	25.278
2	25.307	25.309	25.311	25.286	25.281	25.284
3	25.23	25.236	25.239	25.218	25.217	25.214
4	25.279	25.285	25.283	25.254	25.257	25.253
5	25.233	25.236	25.233	25.206	25.21	25.209
6	25.187	25.182	25.181	25.16	25.158	25.158
7	25.136	25.137	25.133	25.107	25.11	25.11
8	25.158	25.16	25.157	25.138	25.135	25.134
9	25.22	25.216	25.213	25.189	25.193	25.191
10	25.14	25.148	25.146	25.127	25.126	25.129

对表 1 中的数据进行分析，结果如表 2 所示。由此结果知，该测量系统的重复性与再现性百分比 ($R \& R\%$) 为 25.8%，精度公差比 ($P/T\%$) 为 43.85%。显然，两者均超过了 10%，表明测量系统能力不足^[3]。

表 2 半圆管测量系统分析

来源	方差	标准差	测量系统能力
重复性	0.0000062	0.0024866	$R \& R\% = \frac{0.0024866}{0.0659903} \times 100\% = 25.8\%$
再现性	0.0002838	0.0168457	
测量者	0.0002803	0.0167419	
测量者*样品	0.0000035	0.0018675	$P/T\% = \frac{5.15 \times 0.0024866}{25.5 - 25.3} \times 100\% = 43.85\%$
样品	0.0040648	0.0637554	
总计	0.0043547	0.0659903	

进一步分析会发现，该测量系统的变异主要源于再现性误差。项目小组经过研究发现，再现性较高的原因是测量作业标准不规范，为此，小组重新制订测量作业标准，并对所有测量人员进行针对性地培训。然后，再次按照上述过程进行测量系统分析，结果为

$R \& R\% = 7.2\%$, $P/T\% = 9.47\%$ 。此时测量系统能力可以接受。

弯管机过程能力分析

在确定测量系统能力充分后，对弯管机过程能力进行评定。项目小组在生产过程稳定条件下，随机抽取 100 件样品，并进行分析，如图 2 所示。此时，计算得到 $Cp = 0.61$ ， $Cpk = -0.56$ 。显然，过程能力严重不足。

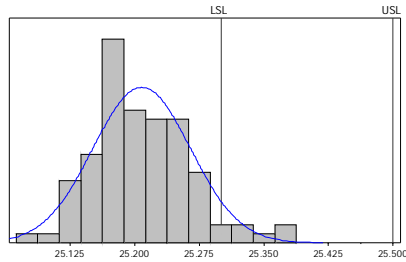


图 2 弯管机过程能力

2.3 分析

弯管机能力不足原因分析

在测量阶段，测得弯管过程的过程能力为 $Cp = 0.61$ ， $Cpk = -0.56$ ，过程能力严重不足。对该过程此前 A 企业从未进行过类似测定，但根据小组成员已知的工程经验，弯管机模具的尺寸误差对半圆管中心距有着直接的影响。根据这个思路，小组对弯管机模具进行测定，发现所使用的模具的尺寸偏大，不符合设计要求。

焊接缺陷原因分析

为找出影响焊接缺陷的主要原因，小组进行了因果分析，如图 3 所示，并利用多轮投票法^[2]确定主要影响因素。

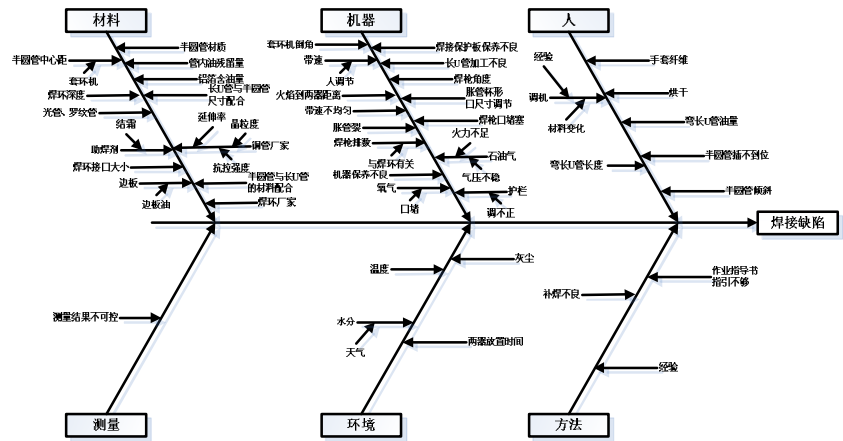


图 3 焊接缺陷因果分析图

经过分析，确定影响焊接缺陷可能的主要原因有：后排枪的距离、后排枪的角度、前排枪的距离、前排枪的角度、后排枪的氧气量、前排枪的氧气量，为方便讨论，依次记为 A、B、C、D、E、F。

2.4 改进

弯管机改善

根据分析结果，对弯管机的模具进行调整，使所用的模具尺寸符合设计要求。并在此基

基础上，再次对该改进后的弯管过程进行过程能力分析，如图 4 所示，计算得到 $Cp = 1.41$ ， $Cpk = 1.15$ ，此时，弯管机过程能力充分。

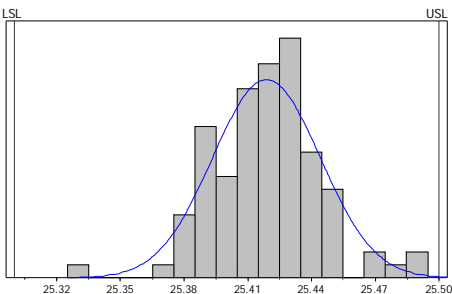


图 4 改进后弯管机过程能力

自动焊工艺参数优化

在分析阶段，确定了影响焊接缺陷的主要原因，为了进一步确定焊接缺陷与各影响因素间的关系，将焊接缺陷的每百件产品上的缺陷数（DPHU）视为响应输出 Y ，借助于试验设计（DOE）。由于因子较多，同时考虑到试验成本，选定 $2^{(6-2)}$ 部分因子试验方案，并安排了 3 次中心点试验。各因子的位级取值如表 3 所示，试验方案及试验结果如表 4 所示，而该部分因子试验的分辨力为 IV，其混淆结构则如表 5 所示。

表 3 自动焊接缺陷影响因素

因素	低水平 (-1)	中心点 (0)	高水平 (+1)
后排枪的距离 (A)	15	16	17
后排枪的角度 (B)	13	15	17
前排枪的距离 (C)	15	16	17
前排枪的角度 (D)	13	15	17
后排枪的氧气量 (E)	53.2	56	58.8
前排枪的氧气量 (F)	22.8	24	25.2

表 4 自动焊试验设计

试验 顺序	A	B	C	D	E	F	y
1	-1	1	-1	1	-1	1	5.63
2	1	1	-1	-1	1	1	7.67
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	8.57
4	0	0	0	0	0	0	10.55
5	1	1	1	1	1	1	2.4
6	-1	1	1	-1	-1	1	8.53
7	0	0	0	0	0	0	6.67
8	-1	-1	1	1	-1	-1	9.8
9	-1	-1	1	-1	1	1	0.53
10	1	-1	1	-1	1	-1	6.6
11	1	-1	-1	1	1	-1	1.53
12	-1	1	-1	-1	1	-1	0.4
13	-1	-1	-1	1	1	1	0.47
14	-1	1	1	1	1	-1	5.33
15	1	-1	1	1	-1	1	24
16	1	1	1	-1	-1	-1	24
17	1	1	-1	1	-1	-1	7.33
18	0	0	0	0	0	0	9.44
19	1	-1	-1	-1	-1	1	1.2

表 5 混淆结构

I	=	A*B*E*F	=	A*C*D*F	=	B*C*D*E
A	=	B*E*F	=	C*D*F	=	A*B*C*D*E
B	=	A*E*F	=	C*D*E	=	A*B*C*D*F
C	=	A*D*F	=	B*D*E	=	A*B*C*E*F
D	=	A*C*F	=	B*C*E	=	A*B*D*E*F
E	=	A*B*F	=	B*C*D	=	A*C*D*E*F
F	=	A*B*E	=	A*C*D	=	B*C*D*E*F
A*B	=	E*F	=	A*C*D*E	=	B*C*D*F
A*C	=	D*F	=	A*B*D*E	=	B*C*E*F
A*D	=	C*F	=	A*B*C*E	=	B*D*E*F
A*E	=	B*F	=	A*B*C*D	=	C*D*E*F
A*F	=	B*E	=	C*D	=	A*B*C*D*E*F
B*C	=	D*E	=	A*B*D*F	=	A*C*E*F
B*D	=	C*E	=	A*B*C*F	=	A*D*E*F
A*B*C	=	A*D*E	=	B*D*F	=	C*E*F
A*B*D	=	A*C*E	=	B*C*F	=	D*E*F

根据表 4 中得到的各次试验的结果进行分析, 方差分析结果如表 6 所示, 各因子效应及显著性分析如表 7 所示。由表 6、表 7 可以看出, 模型的曲性不显著, 主因子中 A、C、E 三个因子影响显著, 此外, 交互作用 A*C、B*D、A*B*D 对响应的影响显著。但是, 考虑到部分因子存在混淆的情况, 所以, 以上分析出的因子是否合理还要看混淆结构。接合表 5 中的混淆结构, 可以看出, 主因子和 3 阶和 4 阶交互作用混淆, 这种情况下, 如果因子显著, 通常认为是主因子显著, 因此, 可以认为 A、C、E 三个因子的影响显著。再看 A*C, 它与 E*F 及两 4 阶交互作用混淆, 通常在实际工程问题中, 高阶交互作用不显著, 因此可以先不考虑两个 4 阶交互作用, 而 A*C 与 E*F 中, 由于 A*C 的亲本因子 A 和 C 均显著, 所以认定 A*C 显著应合理。对于 B*D, 不考虑与高阶交互作用的混淆, 其与 C*E 混淆, 而 C*E 的亲本因子 C 和 E 均显著, 所以认定 C*E 显著更为合理。对于 A*B*D 这个 3 阶交互作用, 它与 A*C*E、B*C*E、D*E*F 混淆, 其中, A*C*E 的亲本因子 A、C 和 E 均显著, 所以认定 A*C*E 显著更为合理。

表 6 方差分析

来源	自由度 (DF)	离差平方和 (SS)	均方和 (MS)	F 值	P (>F)
主因子	6	497.473	82.912	15.71	0.023
2阶交互作用	7	175.332	25.047	4.75	0.114
3阶交互作用	2	135.759	67.879	12.86	0.034
残差	3	15.832	5.277		
曲性	1	7.846	7.846	1.96	0.296
纯误差	2	7.986	3.993		
总和	18	824.397			

表 7 因子效应及显著性分析

因子	效应	T 值	P (>T)
A	4.434	3.86	0.031
B	1.074	0.93	0.419
C	6.049	5.27	0.013
D	-0.126	-0.11	0.919
E	-8.016	-6.98	0.006
F	-1.641	-1.43	0.248
A*B	0.944	0.82	0.472
A*C	3.769	3.28	0.046
A*D	-0.926	-0.81	0.479
A*E	-1.566	-1.36	0.266
A*F	0.594	0.52	0.641
B*C	-1.241	-1.08	0.359
B*D	-4.851	-4.22	0.024
A*B*C	-2.876	-2.5	0.087
A*B*D	-5.066	-4.41	0.022

根据上述, 分析, 确定显著因子为 A、C、E、A*C、C*E、A*C*E。据此, 将模型中的非显著项剔除, 并重新拟合模型, 进行分析, 得出二次拟合后各因子效应及显著性如表 8 所示。对模型适合性作进一步的分析发现, 模型的适合性没有存在问题。

表 8 二次拟合各因子效应及显著性

因子	效应	T值	P(>T)
A	4.434	3.26	0.007
C	6.049	4.45	0.001
E	-8.016	-5.9	0
A*C	3.769	2.77	0.017
C*E	-4.851	-3.57	0.004
A*C*E	-5.066	-3.73	0.003

通过试验设计及分析，可得出焊接缺陷 DPHU 与上述各因子间有如下关系：

$$Y = 7.403 + 2.217A + 3.024C - 4.008E \\ + 1.884A * C - 2.426C * E - 2.533A * C * E$$

试验设计的目标是极小化 DPHU，根据上述模型得到的最优工艺参数为：

A=-1，即后排枪的距离为 15cm；

C=-1，即前排枪的距离为 15cm；

E=1，即后排枪的氧气量为 58.8 升/分。

小组按照上述分析结果对工艺参数进行调整，并对结果加以验证。在上述参数条件下生产了 200 台蒸发器，检测得 DPHU 可以控制在 0.05 以内。过程质量显著提高。

(5) 控制

弯管机过程

在作业指导书中，增加弯管机换模时必须进行模具尺寸的测定并填写换模记录表，以确保模具尺寸符合要求。

对弯管过程输出的半圆管的中心距建立 $\bar{X} - R$ 控制图（如图 5），对弯管过程进行监控。

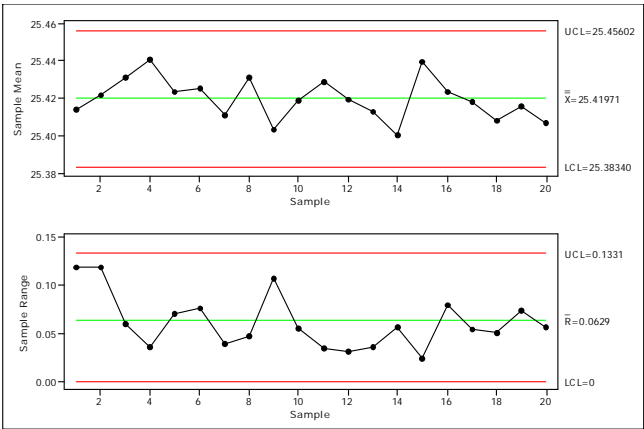


图 5 半圆管中心距 $\bar{X} - R$ 控制图

3. 结论与展望

通过项目选择并按照 DMAIC 流程进行系统性改进，A 企业成功使其自动焊过程的焊接缺陷的 DPHU 水平由 6 下降至 0.05 以下，效果明显。同时，通过改进自动焊过程的焊接不良问题，提高了顾客满意度，符合企业经营战略所期望的要求。

4. 参考文献

- [1] 马林等. 六西格玛管理[M]. 中国人民大学出版社. 北京: 2004, P61-67.
- [2] Pyzdek T. The Six Sigma Handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 2003.

-
- [3] Ford, GM, Chrysler. Measurements Systems Analysis Reference Manual. AIAG, Detroit, Michigan, 1995.
 - [4] Nancy R. Tague. The Quality Toolbox, 2nd edition [M]. New Yoke: ASQ Quality Press; 2005.
-